

DOI: 10.53078/20778481\_2022\_3\_42

УДК 621.5.015

*М. М. Кожевников, В. М. Шеменков, М. Н. Миронова, И. Э. Илюшин*

## МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

*М. М. Kozhevnikov, V. M. Shemenkov, M. N. Mironova, I. E. Iliushin*

## TECHNIQUE OF OPTIMAL ROBOTIC MANIPULATOR PLACEMENT IN COMPUTER-AIDED DESIGN PROBLEMS

### Аннотация

Предложена методика для оптимального размещения роботов-манипуляторов относительно окружения в составе автоматизированных ячеек, основанная на учете кинематических и геометрических характеристик робота и технологического инструмента. Методика позволяет найти размещение робота относительно элементов окружения, при котором инструмент реализует технологическую траекторию с минимальным объемом движений звеньев манипулятора. Предложенный подход применим при эффективном автоматизированном проектировании компоновок технологических ячеек на базе роботов-манипуляторов.

### Ключевые слова:

робот-манипулятор, оптимальное размещение, автоматизированное проектирование.

### Для цитирования:

Методика оптимального размещения роботов-манипуляторов в задачах автоматизированного проектирования / М. М. Кожевников, В. М. Шеменков, М. Н. Миронова, И. Э. Илюшин // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 3 (76). – С. 42–51.

### Abstract

A technique is proposed for optimal placement of robotic manipulators relative to the environment as part of automated cells, which takes into account kinematic and geometric characteristics of the robot and the technological tool. The technique makes it possible to find that placement of the robot relative to the environment elements, in which the tool implements a technological trajectory with a minimum amount of movement of manipulator links. The proposed approach is applicable for efficient automated design of technological cell layouts based on robotic manipulators.

### Keywords:

robotic manipulator, optimal placement, computer-aided design.

### For citation:

Technique of optimal robotic manipulator placement in computer-aided design problems / M. M. Kozhevnikov, V. M. Shemenkov, M. N. Mironova, I. E. Iliushin // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 3 (76). – P. 42–51.

### Введение

Повышение гибкости технологических процессов в современном производстве достигается за счет применения компактных роботизированных ячеек. Такие ячейки показали достаточную

эффективность в мелкосерийном производстве с часто меняющейся номенклатурой изделий [1, 2]. Современные роботы-манипуляторы можно довольно быстро перепрограммировать при изменениях в ходе технологического процесса. Например, в условиях технологи-

ческого процесса лазерной резки металла применение роботов-манипуляторов показывает высокую эффективность при обрезке кромок и вырезе проемов в листах.

Системы управления роботов-манипуляторов позволяют довольно эффективно реализовать траектории технологического инструмента в условиях достаточно сложного окружения, при этом на этапе проектирования возникают задачи поиска рационального размещения манипулятора в автоматизированной ячейке. Причем при проектировании такой ячейки необходимо учесть ограниченность траектории технологического инструмента и робота. В [1–4] исследованы задачи автоматизированного проектирования компактных роботизированных ячеек с учетом ряда кинематических ограничений и параметров окружения робота-манипулятора. Однако при этом предполагается отсутствие столкновений при движении рабочей точки инструмента по технологически заданной траектории, достижимость которой проверяется при различных положениях и конфигурациях робота-манипулятора. Перемещения робота определяются путем геометрического моделирования с обеспечением допустимой ориентации технологического инструмента без учета объема движения звеньев.

Предлагается методика для рационального размещения робота-манипулятора в технологической ячейке с учетом его кинематических и геометрических характеристик, а также с учетом геометрии технологического инструмента. Методика эффективно позволяет найти оптимальное размещение робота относительно элементов окружения по критерию минимизации объема движений его звеньев.

### **Методика оптимального размещения роботов-манипуляторов**

Технологический процесс, автоматизированный на базе роботов-манипу-

ляторов, предполагает наличие некоторой заранее заданной траектории движения рабочей точки инструмента. Например, при автоматизации технологических процессов в машиностроительном производстве захватное устройство робота перемещает заготовки и детали между станками по заданной траектории [1]. Другими примерами подобных траекторий могут служить контуры реза в технологическом процессе лазерной резки и линии нанесения сварных швов в технологических процессах сварки [2, 3]. Заданная траектория (рис. 1) в наиболее общем виде может быть описана множеством векторов  $\{p_i \in R^3\}$ ,  $i = 1 \dots N$ , которые определяют координаты дискретных положений рабочей точки технологического инструмента [4]. Для каждого такого положения определяется единичный вектор  $n_i \in R^3$ , описывающий ось вращения технологического инструмента, и единичный вектор  $a_i = (p_{i+1} - p_i) / |p_{i+1} - p_i|$ , описывающий направление движения технологического инструмента вдоль траектории. С учетом этих обозначений введем следующую матрицу преобразования, позволяющую описать ориентацию и положение технологического инструмента для каждой точки заданной траектории с номером  $i$ :

$$H_i = \begin{bmatrix} a_i & a_i \times n_i & n_i & p_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4}, \quad (1)$$

где символом « $\times$ » обозначено векторное произведение.

При перемещении технологического инструмента вдоль заданной траектории допускается изменять его ориентацию путем вращения вокруг вектора направления  $a_i$  на угол  $\alpha_j \in [\alpha_{\min} \alpha_{\max}]$ , вращения вокруг вектора подхода  $a_i \times n_i$  на угол

$\beta_j \in [\beta_{\min} \beta_{\max}]$  и вращения вокруг вектора  $n_i$  на угол  $\gamma_j \in [\gamma_{\min} \gamma_{\max}]$  ( $j = 1 \dots M$ ). Соответствующая матрица преобразования, описывающая положение

и ориентацию повернутого технологического инструмента, может быть представлена в виде

$$L_i = R(a_i, \alpha_j)R(a_i \times n_i, \beta_j)R(n_i, \gamma_j)H_i, \quad (2)$$

где  $R(a_i, \alpha_j)$  – матрица вращения вокруг вектора  $a_i$  на угол  $\alpha_j$ ;  $R(a_i \times n_i, \beta_j)$  – матрица вращения во-

круг вектора  $a_i \times n_i$  на угол  $\beta_j$ ;  $R(n_i, \gamma_j)$  – матрица вращения вокруг вектора  $n_i$  на угол  $\gamma_j$ .

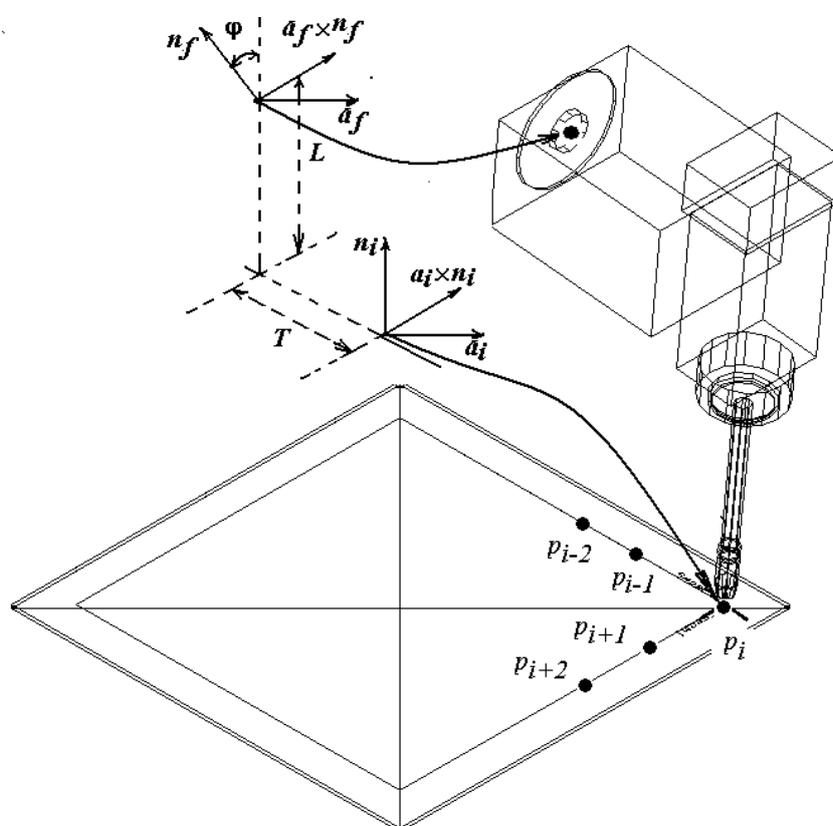


Рис. 1. Параметры и системы координат технологического инструмента

Аналогичным образом ориентация фланца манипулятора может быть определена тремя единичными векторами  $a_f, a_f \times n_f, n_f$ . Относительно этих векторов задаются следующие геометрические характеристики технологического инструмента:  $T$  – сдвиг рабочей

точки инструмента относительно фланца робота;  $L$  – сдвиг рабочей точки в направлении вектора вращения  $n_i$ ;  $\varphi$  – угол, на который повернут фланец вокруг вектора  $a_f$ . Тогда матрица преобразования технологического инструмента может быть задана в виде

$${}^f L_p = \begin{bmatrix} -\cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 & -L \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) & -\cos(\varphi) & 0 & L \sin(\varphi) \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Ориентация и смещение базы робота-манипулятора относительно начала мировой координатной системы (рис. 2) могут быть описаны следующей матрицей преобразования:  ${}^0 L_b(x_k)$ , где  $x_k$  – вектор, описывающий сдвиг базы манипулятора относительно начала миро-

вой координатной системы;  $k = 1 \dots K$  – номер позиции робота-манипулятора.

Учитывая выражения (1)–(3), задача перемещения технологического инструмента вдоль заданной траектории может быть формализована в виде следующего уравнения:

$$R(a_i, \alpha_j) R(a_i \times n_i, \beta_j) R(n_i, \alpha_j) H_i = {}^0 L_b(x_k) {}^b L_f(q_{i,j}^k) {}^f L_p, \quad (4)$$

где  ${}^b L_f(q_{i,j}^k)$  – матрица преобразования манипулятора;  $q_{i,j}^k \in R^d$  – вектор углов в сочленениях манипулятора;  $d$  – количество степеней свободы манипулятора.

Векторы углов в сочленениях  $q_{i,j}^k$  можно определить для каждой комбинации допустимых значений углов ориентации технологического инструмента  $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$  и вектора сдвига манипулятора  $x_k$  из уравнения (4) с использованием известных подходов к решению обратной кинематической задачи [5–7]. Причем для каждой из  $d$  конфигураций робота-манипулятора и вектора сдвига  $x_k$  может быть определено  $3 \cdot M \cdot K$  допустимых векторов  $q_{i,j}^k$ , обеспечивающих перемещение технологического инструмента по заданной траектории. Значения координат векторов  $q_{i,j}^k$  ограничены кинематическими параметрами робота-манипулятора и близостью звеньев и технологического инструмента к препятствиям. Подобные ограниче-

ния можно задать в общем виде

$$\Omega_{kin}(q_{i,j}^k, \mu) = 0; \quad \Omega_{col}(q_{i,j}^k, \mu) = 0, \quad (5)$$

где  $\Omega_{kin}, \Omega_{col}$  – функции, равные нулю, если соответствующие ограничения не нарушаются.

Функции (5) определяются для конкретной роботизированной ячейки с учетом кинематических параметров и ограничений конкретного робота-манипулятора, а также с учетом геометрических характеристик его окружения (препятствий).

Для оценки качества движения робота-манипулятора, размещенного со сдвигом базы  $x_k$ , применен критерий объема движений его звеньев

$$J_n = \sum_{j=1}^N |q_{n,i,j}^k - q_{n,i-1,l}^k|, \quad (6)$$

где  $n = 1 \dots d$ .

Тогда последовательность движений робота-манипулятора при перемещении технологического инструмента вдоль заданной траектории определяет-

ся минимизацией следующего критерия:

$$\min_{\alpha_j, \beta_j, \gamma_j} \sum_{n=1}^d w_n J_n, \quad (7)$$

где  $w_n$  – весовые коэффициенты.

Критерий поиска оптимального размещения робота-манипулятора в автоматизированной ячейке может быть представлен в виде

$$J_{opt} = \min_{\alpha_j, \beta_j, \gamma_j} \sum_{n=1}^d w_n J_n \rightarrow \min_{x_k}. \quad (8)$$

С учетом того, что в процессе движения технологического инструмента по заданной траектории размещение базы манипулятора не изменяется, имеется возможность разбить процедуру

оптимизации на два этапа. Первый этап предполагает разбиение области значений векторов  $x_k$  с некоторым шагом дискретизации, причем для каждого значения смещения базы ищется последовательность движений робота-манипулятора, на которой достигается минимума критерий (7). При этом учитываются ограничения (4), (5) при различных значениях индикаторов конфигурации робота. На втором этапе выбирается такое смещение манипулятора  $x_k$ , которому соответствует минимальная величина критерия (8). Поиск минимального значения критерия (7) может быть выполнен известными методами, например, на основе представления конфигурационного пространства робота в виде направленного графа, предложенного и исследованного в [8–10].

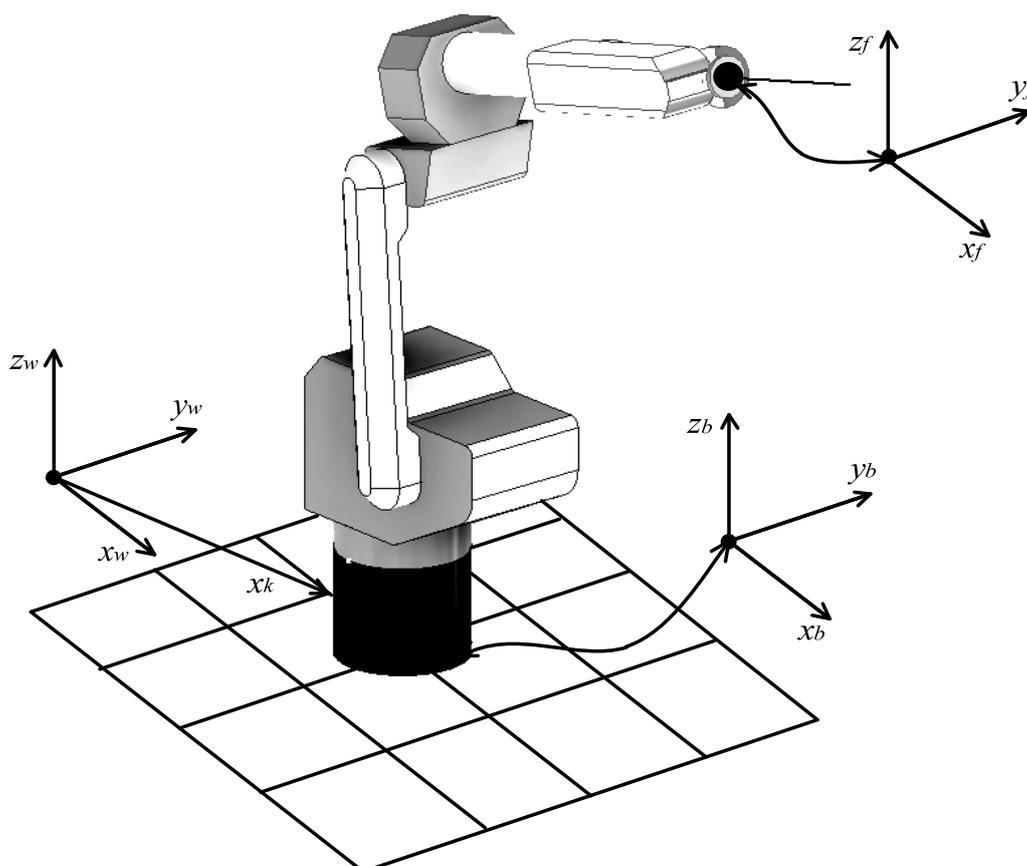


Рис. 2. Использованные системы координат манипулятора

### Исследование предложенной методики на модельном примере

Для тестирования и исследования применимости предложенной методики оптимального размещения роботоманипуляторов в условиях систем автоматизированного проектирования использована трехмерная модель манипулятора Fanuc 710iC/50. Подобные манипуляторы широко применяются в роботизированном производстве для задач сварки, лазерной резки и перемещения. Наличие трех переносных и трех ориентирующих степеней свободы позволяет эффективно перемещать технологический инструмент по заданным траекториям различной формы. В рассмотренном примере использовалась траектория, заданная в виде прямоугольника с

двумя диагоналями, показанная ранее на рис. 1. При моделировании использовался специализированный программный модуль для системы автоматизированного проектирования в Autodesk Inventor, при этом кисть роботоманипулятора обеспечивала ориентирование технологического инструмента. Дискретизация заданной траектории выполнена с параметром  $N = 50$ .

Каждое из найденных в ходе моделирования положений базы роботоманипулятора предложенное программное обеспечение отмечает цилиндром (рис. 3), высота которого соответствует величине критерия объема движений (7). Наиболее низкие цилиндры соответствуют минимальному значению критерия (7).

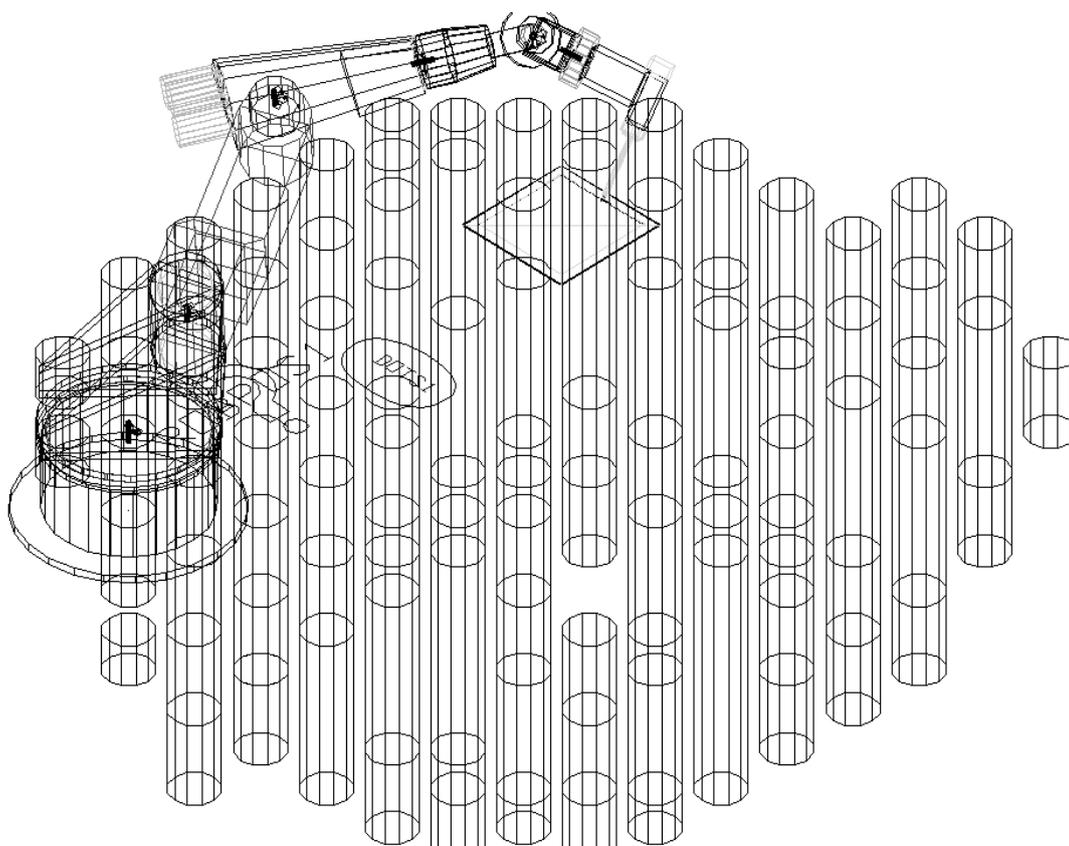


Рис. 3. Трехмерная модель робота-манипулятор Fanuc при обходе прямоугольной траектории

В ходе моделирования установлено, что для данной компоновки автоматизированной ячейки допустимыми являются только две конфигурации манипулятора («Инструмент вверх» –  $\mu = 1$  и «Инструмент вниз» –  $\mu = -1$ ). При остальных конфигурациях заданная

траектория недоступна вследствие кинематических ограничений манипулятора. На рис. 4 показана результирующая компоновка компактной автоматизированной ячейки с позиционированием технологического инструмента на заданную траекторию.

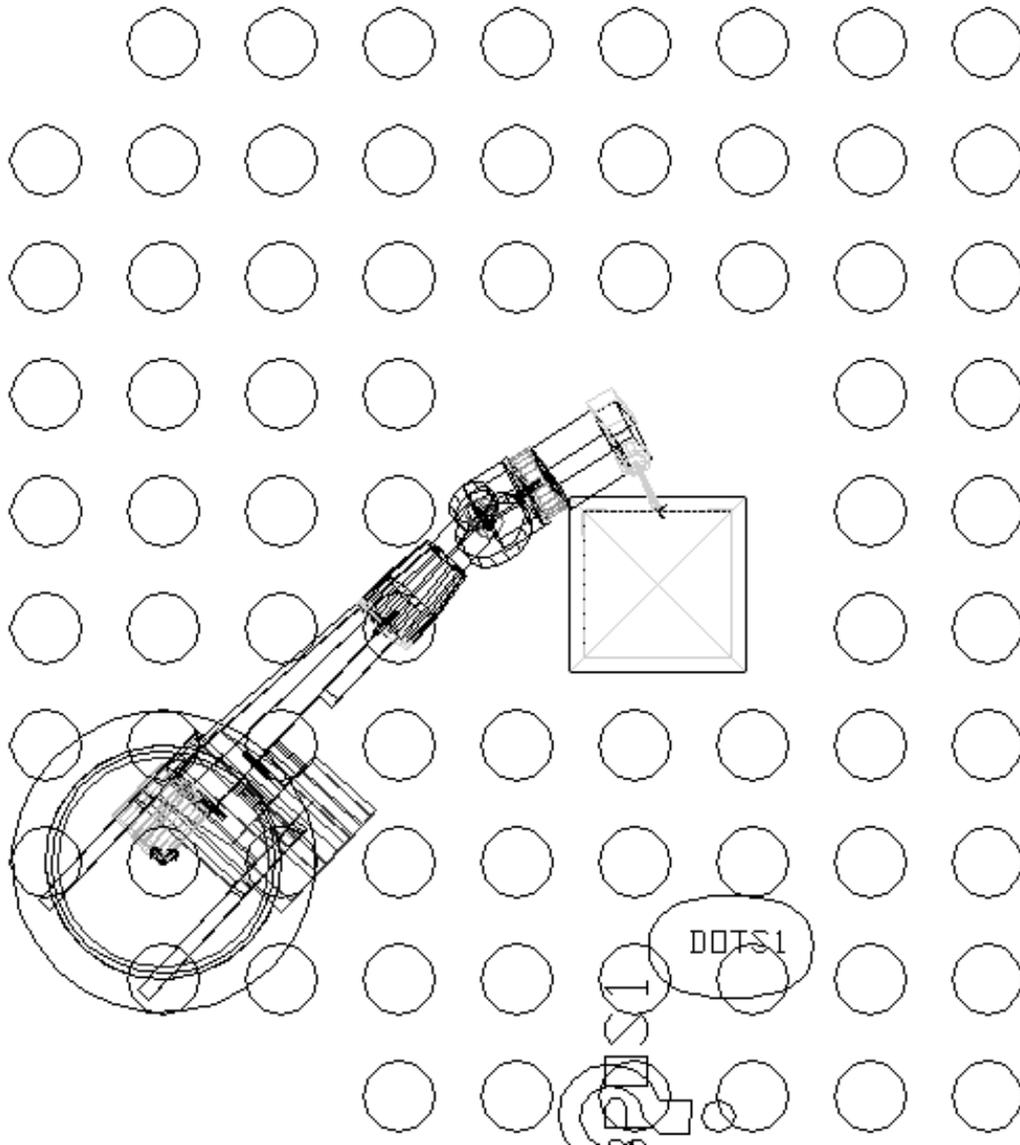


Рис. 4. Результирующая компоновка автоматизированной ячейки

Проведенное исследование предложенной методики показало, что для всех допустимых конфигураций  $\mu$  обеспечивается определение оптимального размещения робота-манипулятора за

приемлемое в условиях систем автоматизированного проектирования время. Например, при шаге дискретизации пространства поиска, равном 0,1 м, и заданной траектории из 100 точек

позиционирования время моделирования составило около 6 мин на персональном компьютере среднего ценового уровня. При этом сокращение времени вычислений может быть достигнуто путем поэтапного снижения размера шага дискретизации пространства поиска, поскольку полученная область решений имеет близкие зна-

чения объема движений.

Исследование зависимости критерия объема движений (7) от значений весовых коэффициентов показало наибольшую зависимость от них для первого и третьего сочленений робота-манипулятора (рис. 5).

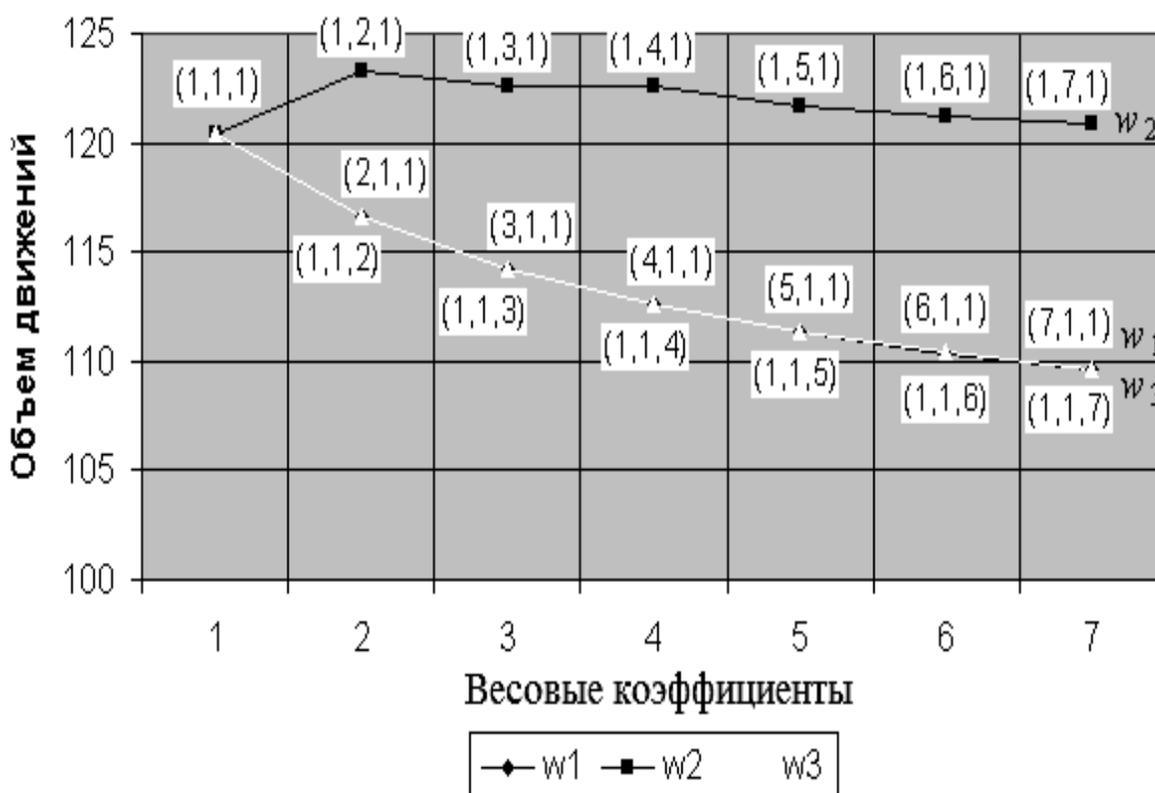


Рис. 5. Зависимость критерия качества (7) от значений весовых коэффициентов

Например, изменение коэффициента  $w_1$  от значения 1 до значения 2 снижает величину критерия качества на 3,2 %, тогда как изменение этого же коэффициента от значения 6 до значения 7 приводит к незначительному снижению критерия качества (0,62 %). Таким образом, наибольшие значения весовых коэффициентов рационально устанавливать для первого и третьего сочленений робота-манипулятора.

Для того чтобы оценить эффек-

тивность применения предложенной методики размещения робота-манипулятора Fanuc 710iC/50 относительно заданной прямоугольной траектории, проведено сравнение суммарного объема движений звеньев для типовой компоновки автоматизированной ячейки и улучшенной компоновки, приведенной на рис. 4. Сравнение показало, что применение улучшенного по предложенной методике решения позволяет снизить объемы движения робота-манипулятора

в среднем на 20 % в сравнении с компоновкой, полученной традиционными методами систем автоматизированного проектирования.

Таким образом, проведенные исследования показали, что разработанная методика оптимального размещения может достаточно эффективно использоваться в автоматизированном проектировании компактных роботизированных ячеек для различных технологических процессов.

### **Выводы**

Была предложена новая методика оптимального размещения роботов-манипуляторов, которая может достаточно эффективно использоваться в задачах автоматизированного проектирования роботизированных ячеек для различных технологических процессов.

Разработанная методика позволяет эффективно учесть геометрические и кинематические ограничения, возникающие при перемещении технологического инструмента по заданной траектории, и обеспечивает определение оптимального размещения робота относительно окружения по критерию объема движений звеньев.

Выполнено тестирование и исследование применимости предложенной методики оптимального размещения роботов-манипуляторов в условиях систем автоматизированного проектирования. Проведенное исследование показало, что разработанная методика оптимального размещения робота-манипулятора в ячейке применима для задач автоматизированного проектирования различных технологических процессов.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Moslemipour, G.** A review of intelligent approaches for designing dynamic and robust layouts in flexible manufacturing systems / G. Moslemipour, T. Lee, D. Rilling // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2012. – Vol. 60 (1). – P. 11–27.
2. **Moharana, B.** Optimization and Design of a Laser-Cutting Machine using Delta Robot / B. Moharana, R. Gupta, B. Kushawaha // *International Journal of Engineering Trends and Technology*. – 2014. – Vol. 10 (4). – P. 176–179.
3. **Geiger, M.** Integration of Laser Material Processing into the Computer-Aided Product and Process Development / M. Geiger, A. Kach // *Proceedings of the 3rd International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*. – 2000. – P. 69.
4. **Dolgui, A.** Manipulator motion planning for high speed robotic laser cutting / A. Dolgui, A. Pashkevich // *International Journal of Production Research*. – 2009. – Vol. 47 (20). – P. 5691–5715.
5. **Qiao, S.** Inverse kinematic analysis of the general 6R serial manipulators based on double quaternions / S. Qiao, Q. Liao, S. Wei, H. J. Su // *Mechanism and Machine Theory*. – 2010. – Vol. 45 (2). – P. 193–199.
6. Комбинированный метод синтеза траекторий сборочно-сварочных роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями / М. М. Кожевников [и др.] // *Доклады БГУИР*. – 2016. – № 1 (95). – С. 12–18.
7. Методы и алгоритмы генерации программных траекторий роботов-манипуляторов в процессе дуговой сварки / М. М. Кожевников [и др.] // *Доклады БГУИР*. – 2019. – № 1 (119). – С. 19–25.
8. Методы и алгоритмы планирования траекторий роботов-манипуляторов для лазерной резки / М. М. Кожевников [и др.] // *Вестн. Белорус.-Рос. ун-та*. – 2019. – № 2. – С. 4–13.
9. Оптимизация траекторий промышленных роботов-манипуляторов для лазерной резки / М. М. Кожевников [и др.] // *Вестн. Белорус.-Рос. ун-та*. – 2020. – № 2 (67). – P. 21–30.
10. Методика оптимизации положения робота-манипулятора в технологическом процессе лазерной резки / М. М. Кожевников [и др.] // *Доклады БГУИР*. – 2021. – № 19 (3). – С. 49–57.

Статья сдана в редакцию 30 июня 2022 года

**Михаил Михайлович Кожевников**, канд. техн. наук, доц., Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий. E-mail: kmmk@mail.ru.

**Владимир Михайлович Шеменок**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: VShemenjv@yandex.ru.

**Марина Николаевна Миронова**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: marinamn16@mail.ru.

**Игорь Эдуардович Илюшин**, канд. техн. наук, Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий. E-mail: iliue@yandex.by.

**Mikhail Mikhailovich Kozhevnikov**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian State University of Food and Chemical Technologies. E-mail: kmmk@mail.ru.

**Vladimir Mikhailovich Shemenkov**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarussian-Russian University. E-mail: VShemenjv@yandex.ru.

**Marina Nikolaevna Mironova**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarussian-Russian University. E-mail: marinamn16@mail.ru.

**Igor Eduardovich Iliushin**, PhD (Engineering), Belarusian State University of Food and Chemical Technologies. E-mail: iliue@yandex.by.